

# 野外土-水特征及其工程意义\*

李爱国<sup>1</sup> 岳中琦<sup>1</sup> 谭国焕<sup>1</sup> 李焯芬<sup>1</sup> 罗锦添<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 香港大学土木工程系 香港) (<sup>2</sup> Carleton 大学土木与环境工程系 渥太华 加拿大)

**摘要** 为了研究非饱和土边坡的土-水特征,在香港某人工边坡坡顶 1, 2, 3, 4 m 等不同深度同时安装了含水量计及吸力计。根据土体体积含水量和吸力值的野外监测结果,得出了边坡坡顶土体不同深度的野外土-水特征曲线。同室内土-水特征曲线明显的滞后性相比,野外土-水特征曲线的滞后性可以忽略。野外土-水特征曲线滞后性可以忽略的原因可能是由于边坡坡顶土体在暴雨期间的非平衡效应或者是体积含水量和吸力在野外和在实验室内测定方法不同的缘故。此外,对野外土-水特征曲线的工程意义进行了探讨。

**关键词** 土力学, 野外土-水特征, 非饱和土, 含水量计, 吸力计

分类号 P 642.22, TU 411.4

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)06-0969-05

## FIELD SOIL-WATER CHARACTERISTICS AND ITS ENGINEERING IMPLICATION

Li A G<sup>1</sup>, Yue Z Q<sup>1</sup>, Tham L G<sup>1</sup>, Lee C F<sup>1</sup>, Law K T<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

(<sup>2</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada)

**Abstract** In order to study soil-water characteristics of unsaturated soil slope, moisture probe and tensiometers are installed simultaneously for the soils at depths of 1, 2, 3 and 4 m at the crest of a cut slope in Hong Kong. Based on the field monitored results of volumetric water content and matric suction, field soil-water characteristic curves for the soils at different depths at the crest are determined. Compared with the obvious hysteresis of laboratory soil-water characteristic curves, the field soil-water characteristic curve shows negligible hysteresis. The negligible hysteresis may be attributed to the non-equilibrium effect during the heavy rainfall or the different measurements of volumetric water contents and matric suctions in the field and laboratory. Furthermore, the engineering implication of the field soil-water characteristic curve is also discussed in this paper.

**Key words** soil mechanics, field soil-water characteristics, unsaturated soil, moisture probe, tensiometer

## 1 前言

土-水特征曲线是非饱和土中体积含水量和吸力的关系曲线,它是非饱和土力学中的一项重要特性。其基本参数有空气进气值及残余含水量。空气进气值是空气进入土体最大孔隙的吸力值,残余含水量是指需要有一定的吸力改变才能降低土体水分

时的含水量。土-水特征曲线在水土保持、边坡稳定、农田灌溉、气象预测及环境工程等方面应用很广。土-水特征曲线通常是在实验室通过体积压力板仪测得的,其测量原理是轴平移技术<sup>[1]</sup>。

土-水特征曲线受土体结构强烈影响,通常粘土矿物愈多,在某特定吸力下的含水量愈高,其曲线的斜率也就愈平缓<sup>[2]</sup>。虽然,有许多的经验公式可以描述土-水特征曲线<sup>[3, 4]</sup>,但是仍然没有从土体的

2003 年 4 月 25 日收到初稿,2003 年 6 月 2 日收到修改稿。

\* 香港研究资助局项目(7123/99E)和香港赛马会慈善信托基金资助项目。

作者 李爱国 简介:男,1968 年生,1990 年毕业于长安大学工系,现为香港大学土木工程系博士研究生,主要从事岩土工程方面的研究工作。

基本性质来推导土-水特征曲线的理论存在。

室内土-水特征曲线干燥过程和浸湿过程曲线通常是不重合的,有明显的滞后性,即在给定吸力下土体干燥过程中的含水量比土体浸湿过程中的含水量要高很多。在土物理学中,对室内土-水特征曲线滞后性有广泛的研究<sup>[5, 6]</sup>,把滞后性的可能原因归于以下几个因素:土体孔隙的几何不均一性、土颗粒间的接触角效应、土体中的空气、土体的膨胀、收缩及老化现象等。

为了正确预测非饱和土中的吸力分布及评价其对边坡稳定性的影响,采用室内土-水特征曲线干燥曲线抑或是浸湿曲线方面仍有较多的争议。最近有研究表明,土-水特征曲线还同土体中的应力有关<sup>[7, 8]</sup>。所以,有学者建议采用野外土-水特征曲线。然而,由于土-水特征曲线的野外测定通常很困难,在岩土工程中很少有类似的例子,只有在土物理学中有这样的测试<sup>[9]</sup>。文[9]通过人工降雨,在野外同时测定了含水量和吸力,并确定了野外土-水特征曲线,其测得的野外土-水特征曲线在低吸力范围( $< 26$  kPa)显示有滞后性,但在较高吸力范围( $> 26$  kPa)其滞后性则可以基本忽略。土物理学中在野外对土体含水量和吸力的同时测量虽有很多实例<sup>[10, 11]</sup>,但这些实例并未对其野外土-水特征曲线进行研究。

在岩土工程中,由于土-水特征曲线不但可以用来模拟非饱和地下水流,同时还可以用来预测非饱和土的其他参数,如渗透系数函数和抗剪强度函数等,显然对土-水特征曲线的确定显得非常重要。但是,由于野外土-水特征曲线的测定历时很长,且野外吸力变化范围通常较小,所以,在岩土工程应用中通常采用室内土-水特征曲线。本文介绍了野外土-水特征曲线的确定,并发现野外土-水特征曲线的滞后性可以忽略,其干燥曲线和浸湿曲线基本重合。另外,本文还对野外土-水特征曲线的工程意义进行了讨论。

## 2 野外试验简介

试验场地位于香港地区某人工边坡的坡顶上。该边坡的地质条件为风化花岗岩,主要由全风化和强风化花岗岩组成。野外试验采用了含水量计、吸力计、测水管、孔隙水压力计、测斜仪、土压力盒以及降雨计等一系列仪器。其中,大部分仪器与数据采集仪连接,从而可以对边坡进行自动数字监测。自动监测系统设计为每 15 min 采集一次数据。该试

验综合自动监测系统已在文[12]中详细介绍。

由于颗粒筛分曲线同土-水特征曲线的相似性,在根据颗粒筛分曲线预测土-水特征曲线方面,许多学者做了很多研究<sup>[13, 14]</sup>。坡顶土样颗粒筛分曲线见图 1。图 1 表明,坡顶土样 2 m 深的粉粘粒含量最多,达 44.6%。

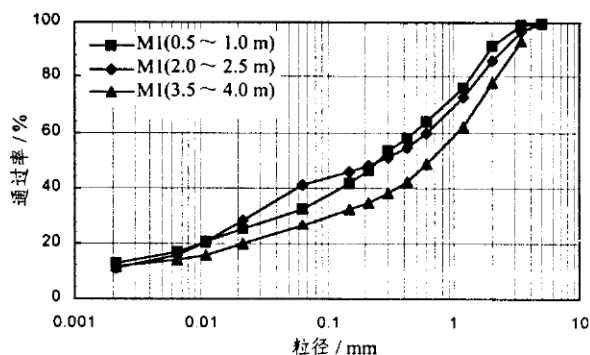


图 1 坡顶土样颗粒筛分曲线

Fig.1 Particle size distribution curves of soil samples at crest

为了比较野外土-水特征曲线与室内土-水特征曲线,对坡顶 2 m 处的土样做了体积压力板仪试验,其结果见图 2。图 2 显示的室内土-水特征曲线的空气进气值为 5~10 kPa。图 2 表明,室内土-水特征曲线有明显的滞后性。

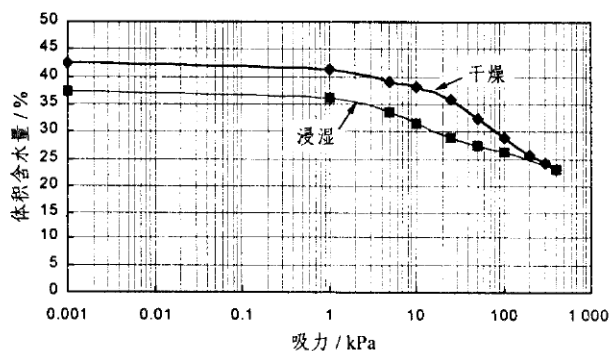


图 2 坡顶 2 m 土样室内土-水特征曲线

Fig.2 Laboratory measured soil-water characteristic curves for 2 m deep soil samples at crest

野外试验在被监测边坡坡顶土体 1 m 范围内的 4 个不同深度(1, 2, 3 和 4 m)分别安装了 4 个含水量计和 4 个吸力计,同一深度上同时安装了 1 个含水量计和 1 个吸力计,其水平距离为 0.5 m 左右。通过含水量计和吸力计,可以对坡顶土体在不同深度的体积含水量和吸力同时进行监测。含水量计和吸力计的安装详见文[12]。坡顶体积含水量及吸力

的量测只是该边坡监测试验的一部分。

### 3 野外土-水特征曲线的确定

坡顶土体含水量和吸力的野外监测始于 2001 年 6 月,分析用的数据取到 2001 年 12 月,总共有 6 个月时间,包括了 2001 年的雨季及早季。图 3 和 4 分别为坡顶土体不同深度体积含水量和吸力在 2001 年 6 月至 12 月的变化及其与每日降雨的比较。

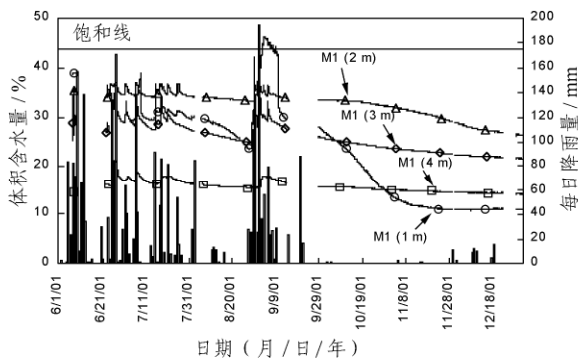


图 3 坡顶土体 2001 年 6~12 月体积含水量的变化

Fig.3 Variations of soil volumetric water contents from June to December 2001 at crest

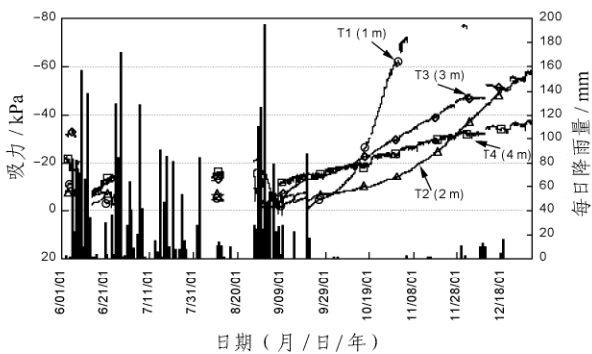


图 4 坡顶土体 2001 年 6~12 月吸力的变化

Fig.4 Variations of soil matric suctions from June to December 2001 at crest

根据坡顶土体不同深度同时测得的体积含水量及吸力,绘制了坡顶不同深度土体野外土-水特征曲线(图 5~8)。每一深度土体野外土-水特征曲线分别包含了成千上万的体积含水量和吸力值。由于监测期间有多次降雨入渗及蒸发过程,所以,其野外土-水特征曲线也包含了多次浸湿和干燥过程。根据图 5~8 的野外土-水特征曲线,可以看出:

(1) 坡顶土体不同深度的野外土-水特征曲线显示不同的体积含水量和吸力变化范围值。浅层体积

含水量和吸力的变化范围通常较大,其原因是浅层土体受降雨入渗和蒸发的影响最大。

(2) 野外监测的多次浸湿和干燥过程中,坡顶 1, 2, 3 和 4 m 深土体的野外土-水特征曲线显示可以忽略的滞后性。图 5 显示 1 m 深野外土-水特征曲线在  $-3$  kPa 以下测得的体积含水量离散性较大,其原因可能是当 1 m 土体接近饱和或完全饱和时,含水量计的测量结果可能有较大的误差。

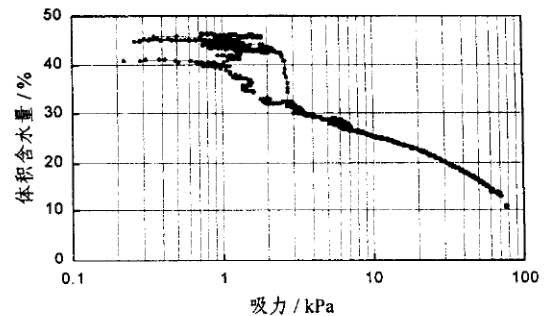


图 5 坡顶 1 m 深土体野外土-水特征曲线

Fig.5 Field measured soil-water characteristic curve for 1 m deep soil at crest

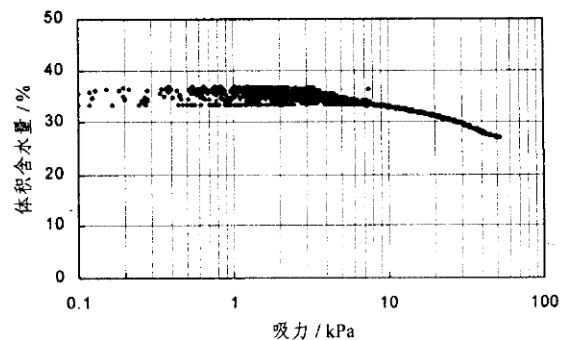


图 6 坡顶 2 m 深土体野外土-水特征曲线

Fig.6 Field measured soil-water characteristic curve for 2 m deep soil at crest

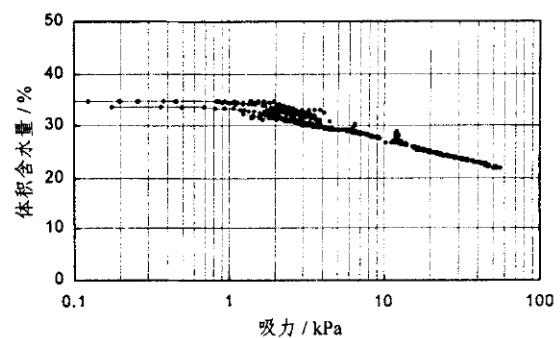


图 7 坡顶 3 m 深土体野外土-水特征曲线

Fig.7 Field measured soil-water characteristic curve for 3 m deep soil at crest

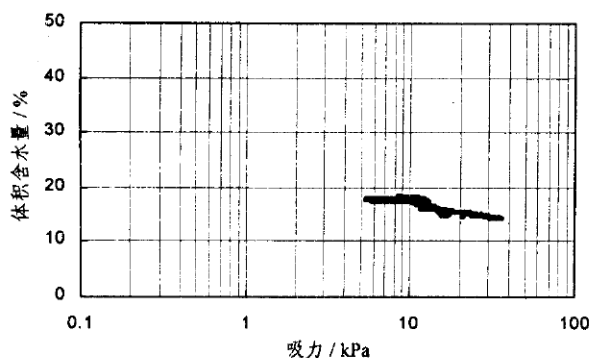


图 8 坡顶 4 m 深土体野外土-水特征曲线

Fig.8 Field measured soil-water characteristic curve of 4 m deep soil at crest

为了比较坡顶不同深度的野外土-水特征曲线,将不同深度土体土-水特征曲线绘制在同一张图上(图 9)。由图 9 可知,坡顶不同深度土体野外土-水特征曲线的形状并不完全相同,其中,以 2 m 深土体野外土-水特征曲线的斜率最为平缓。坡顶不同深度土体野外土-水特征曲线形状不完全相同的原因可能是由于其颗粒筛分曲线形状的不同。坡顶 2 m 深土体野外土-水特征曲线斜率最为平缓的原因可能是由于坡顶 2 m 深土样粉粘粒含量最高(44.6%)。

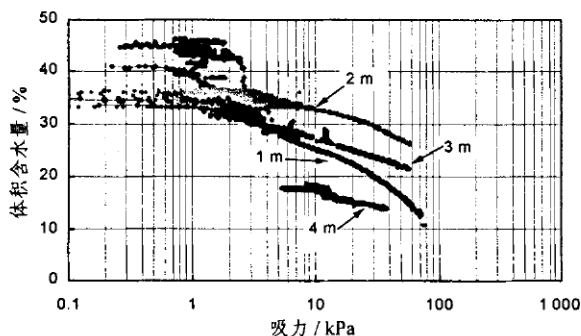


图 9 坡顶不同深度土体野外土-水特征曲线比较

Fig.9 Comparison of field soil-water characteristic curves of soils at different depths at crest

另外,为了比较坡顶土体同一深度的野外与室内土-水特征曲线,将坡顶 2 m 深土体土样的室内土-水特征曲线与坡顶 2 m 深土体野外土-水特征曲线绘制在同一张图上(图 10)。根据图 10,进一步得出:

(1) 野外土-水特征曲线基本不显示滞后性,而室内土-水特征曲线显示非常明显的滞后性。

(2) 野外土-水特征曲线与室内土-水特征曲线的干燥段有较大的区别,而与室内土-水特征曲线的浸湿段很接近。

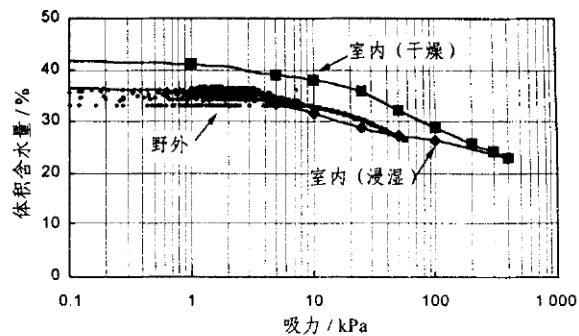


图 10 坡顶 2 m 深土体野外和室内土-水特征曲线比较

Fig.10 Comparison of field and laboratory soil-water characteristic curves for 2 m deep soil at crest

#### 4 野外土-水特征曲线的工程意义

室内体积平板仪试验显示室内土-水特征曲线有明显的滞后性,即曲线的浸湿段与干燥段并不相同。然而,本文的监测结果表明,野外土-水特征曲线的滞后性并不明显,其干燥曲线与浸湿曲线基本重合。虽然野外土-水特征曲线滞后性不明显的特性在文献中有很少的例子,但渗透系数函数滞后性不明显的特性在文[15]中有介绍。

野外土-水特征曲线滞后性可以忽略的特性可能是由于野外土体中的非平衡效应,因为室内土-水特征曲线通常是在平衡条件下测得的。文[16]观察到瞬时流动时含水量和吸力之间有非平衡效应。所以,暴雨期间,因雨水渗透到非饱和土体时产生了非平衡效应,从而使野外土-水特征曲线显示可以忽略的滞后性。野外土-水特征曲线滞后性可以忽略的另一个原因,可能是体积含水量和吸力在野外和在实验室内测定方法的不同,如土-水特征曲线室内测定的样本小,且要求达到平衡;而野外测定的样本则较大,且通常是动态的等。当然,或许其他一些因素差异,如土的性质、土体中的空气及土体中应力历史等也会影响野外土-水特征曲线。所以,野外测定土-水特征曲线需要有更多的研究。

众所周知,为了准确预测降雨入渗、蒸发过程中非饱和地下水流,无论是用解析法或数值法,都需要指定土-水特征曲线。由于室内土-水特征曲线有明显的滞后性,且这种滞后性对预测非饱和地下水流及非饱和边坡的稳定性有较大的影响,所以,在选择室内土-水特征曲线的干燥段还是浸湿段方面仍然有较大的争议性。由于野外条件下的降雨及蒸发过程反复存在,如果对以上野外不同的干燥过程及浸湿过程分别采用不同的室内土-水特征曲线,将会使解析法及数值法变得非常复杂,从而不利于

解决实际工程问题。如果野外土-水特征曲线滞后性可以忽略的特性具有普遍性,那么在用解析法或数值法分析非饱和地下水流及非饱和边坡稳定性方面可以采用单一的野外土-水特征曲线,从而可以大大简化计算工作。

由于野外土-水特征曲线同室内土-水特征曲线的浸湿段比较接近,如采用室内土-水特征曲线,应采用其浸湿曲线。另外,由于在野外和实验室内对土-水特征曲线测定方法不同,而野外测定的土-水特征曲线更能反映实际情况,因此在应用非饱和土力学解决岩土工程问题时采用野外土-水特征曲线显得更为合理。当然,在解决同非饱和土有关的水土保持、农田灌溉、气象预测及环境工程等方面的问题时,更应采用野外土-水特征曲线。

## 5 结 论

根据香港某边坡坡顶土体野外同时测得的体积含水量和吸力值,确定了该边坡坡顶不同深度土体野外土-水特征曲线,并得出了如下主要结论和建议:

(1) 坡顶不同深度土体野外土-水特征曲线显示不同的体积含水量和吸力变化范围值,体积含水量和吸力的变化范围较大的地方通常发生在坡顶土体的浅部。

(2) 坡顶不同深度土体野外土-水特征曲线并不完全相同,其原因可能是由于其颗粒筛分曲线的不同。

(3) 同室内土-水特征曲线相比,野外土-水特征曲线的干燥段与浸湿段重合,野外土-水特征曲线滞后性可以忽略。野外土-水特征曲线滞后性可以忽略的原因可能是由于野外土体在暴雨期间的非平衡效应或者是土-水特征曲线在野外和在实验室内测定方法的不同。

(4) 野外土-水特征曲线滞后性可以忽略的特性显示在解决同非饱和土有关的地下水流及边坡稳定性方面采用单一的野外土-水特征曲线更为合理。致谢 本文中的监测试验由香港研究资助局项目(7123/99E)和香港赛马会慈善信托基金资助。试验期间,得到了香港拓展署、茂盛土力工程顾问有限公司、中国港湾建设(集团)总公司和 Vibro (HK) Ltd. 的大力协助,作者在此深表谢意。

## 参 考 文 献

- 1 Fredlund D G, Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: Wiley, 1993
- 2 Hillel D. Introduction to Soil Physics[M]. New York: Academic Press, 1982
- 3 Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Can. Geotech. J., 1994, 31(4): 521~532
- 4 Sillers W S, Fredlund D G. Statistical assessment of soil-water characteristic curve models for geotechnical engineering[J]. Can. Geotech. J., 2001, 38(6): 1 297~1 313
- 5 Hanks R J. Applied Soil Physics: Soil Water and Temperature Applications[M]. New York: Springer-Verlag, 1992
- 6 Iwata S, Tabuchi T, Warkentin B P. Soil-Water Interaction: Mechanisms and Applications[M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1995
- 7 Ng C W W, Pang Y W. Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil[J]. Can. Geotech. J., 2000, 37(6): 1 252~1 264
- 8 Vanapalli S K, Pufahl D E, Fredlund D G. The effect of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. Geotechnique, 1999, 49(2): 143~159
- 9 Watson K K, Reginato R J, Jackson R D. Soil water hysteresis in a field soil[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1975, 39(2): 242~246
- 10 Noborio K, Horton R, Tan C S. Time domain reflectometry probe for simultaneous measurement of soil matric potential and water content[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, 63(6): 1 500~1 505
- 11 Wraith J M, Or D. Soil water characteristic determination from concurrent water content measurements in reference porous media[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2001, 65(6): 1 659~1 666
- 12 李爱国, 岳中琦, 谭国焕等. 香港某边坡综合自动监测系统的设计和安装[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 790~796
- 13 Gupta S C, Larson W E. Estimating soil-water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density[J]. Water Resources Research Journal, 1979, 15(6): 1 633~1 635
- 14 Fredlund M D, Fredlund D G, Wilson G W. Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties[A]. In: Fredlund D G ed. 3<sup>rd</sup> Brazilian Symposium on Unsaturated Soils[C]. Rio de Janeiro, Brazil: [s. n.], 1997, 611~620
- 15 Gillham R W, Klute A, Heerman D F. Hydraulic properties of a porous media: measurement and empirical representation[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1976, 40(2): 203~207
- 16 Schultze B, Ippisch O, Huwe B, et al. Dynamic non-equilibrium during unsaturated water flow[A]. In: Van Genuchten M Th, Leij F J, Wu L ed. Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media[C]. Riverside, CA: University of California, 1999, 713~724